

Санкт-Петербургский государственный университет

КОЛУПАЕВА Александра Дмитриевна

Выпускная квалификационная работа

Моделирование катастрофических наводков на реках Черноморского побережья Кавказа

Уровень образования: бакалавриат

Направление 05.03.04 «Гидрометеорология»

Основная образовательная программа СВ.5021.2015 ««Гидрометеорология»

Профиль «Гидрология»

Научный руководитель: доцент кафедры
гидрологии суши СПбГУ, к.т.н.,
Макарьева Ольга Михайловна

Рецензент: научный сотрудник отдела
динамики водной среды ИВП РАН,
к.т.н.,
Айзель Георгий Владимирович

Санкт-Петербург

2019

Введение	3
Глава 1. Гидролого-гидрографическое описание объектов исследования, включая физико-географические аспекты	6
Глава 2. Гидрологическая модель «Гидрограф».....	10
2.1. Общие сведения.....	10
2.2. Репрезентативные точки и стокоформирующие комплексы	11
2.3. Параметры репрезентативных точек	13
3.3. Параметры стокоформирующих комплексов	14
Глава 3. Расчет стока для изученной реки Туапсе.....	17
3.1. Параметризация модели «Гидрограф» для бассейна р. Туапсе.....	17
3.2. Результаты моделирования с суточным расчетным шагом	18
3.3. Моделирование выдающихся паводков на р. Туапсе	20
Глава 4. Расчет стока для неизученной реки Цемес	26
4.1. Параметризация модели «Гидрограф» и верификация параметров для бассейна р. Цемес.....	26
4.2. Моделирование стока в бассейне р. Цемес с суточным расчетным шагом	30
4.3. Моделирование выдающихся паводков на р. Цемес	31
4.4. Расчет максимальных расходов воды дождевых паводков р. Цемес стандартными методами и их сравнение с величинами, полученными по модели «Гидрограф».....	34
Заключение	36
Основные публикации Колупаевой А.Д. по теме исследования.....	38
Список использованной литературы	41

Введение

Ежегодно на территории Российской Федерации наблюдаются гидрометеорологические опасные явления (ГМОЯ), наиболее разрушительными из которых являются опасные гидрологические явления (ГОЯ). Согласно ГОСТ Р 22.0.03-97 под ГОЯ подразумевается событие гидрологического происхождения или результат гидрологических процессов, возникающих под действием различных природных или гидродинамических факторов или их сочетаний, оказывающих поражающее воздействие на людей, сельскохозяйственных животных и растения, объекты экономики и окружающую природную среду. К ГОЯ относятся затопления и подтопления территорий, сход селей, лавин и др. Как правило, наиболее частым ГОЯ являются наводнения различного генезиса.

Одним из регионов, в большей степени подверженному влиянию наводнений, вызванных, в первую очередь, прохождением катастрофических паводков, сформированных выпадением ливневых осадков является Краснодарский край и прилегающие территории, в частности Черноморское побережье. За последние 20 лет на данной территории произошли 3 катастрофических наводнения (события 2002, 2010, 2012 гг.), сопровождающиеся человеческими жертвами и большим материальным ущербом, а также ежегодно происходят подтопления небольших масштабов. По данным СМИ¹ в 2002 году в результате обрушения смерча погибли 62 человека, подтоплены 15 населенных пунктов, в том числе Крымск, Абрау-Дюрсо, Туапсе, Широкая Балка, Новороссийск. В 2010 году в результате наводнения, вызванного мощными дождями, были подтоплены 30 населенных пунктов в Туапсинском районе и в районе Сочи, погибли 17 человек. В 2012 году произошло самое разрушительное наводнение за всю историю, вызванное сильнейшими ливнями, пострадали 10 населенных пунктов, в том числе города Новороссийск, Геленджик, Крымск, поселки Нижнебаканская, Дивноморское, Неберджаевская и Кабардинка. В 2013 году в результате обильных осадков в районе города Сочи были подтоплены 59 частных домовладений, материальный ущерб составил порядка 10 млн рублей.

Все наводнения были вызваны экстремальными осадками, величина, интенсивность и частота которых не наблюдалась ранее. В работе (Meredith и др., 2015) на основе региональных моделей климата выполнили расчеты характеристик ливневых осадков, вызвавших катастрофическое наводнение в Крымске (2012 г.). Авторы сделали вывод о том, что основным фактором выпадения пятимесячной нормы осадков стала температура воды поверхности Черного моря, повысившаяся за последние 30 лет на два градуса. Более того, численные эксперименты показали, что эффект повышения температуры моря нелинеен и

¹ <http://tass.ru/24.info/2071994>

«осадки резко увеличиваются после определенного порога, который как раз был достигнут в начале XXI века»².

Природные факторы формирования стока совместно с ливневым характером осадков обуславливают малое время добегания волн паводков, быстрый подъем и спад уровня воды и многократное увеличение расходов воды (Алексеевский и др., 2016). Усугубляет ситуацию и хозяйственная деятельность человека, приуроченная непосредственно к руслу горных рек. Проблемой региона также является оценка максимальных характеристик стока в задачах проектирования и строительства. Гидрологическая сеть региона значительно сократилась в последние десятилетия, часто при прохождении паводков гидрологические посты разрушаются, а оцененные величины расходов по меткам высоких вод имеют неоднозначный характер из-за заторных явлений, вызванных корчеходом. Множество работ посвящено в основном описанию гидрометеорологической ситуации в данном регионе и анализу уже произошедших ГОЯ (Алексеевский и др., 2016; Асарин А.Е., Жиркевич А. Н., 2012; Базелюк А.А., Лурье П. М., 2014; Колтерман К. П. и др., 2012). Стоит отметить, что разработанные в настоящее время методы оценки максимальных характеристик основаны на статистической обработке гидрометеорологической информации, однако из-за отсутствия в историческом промежутке времени ливней высокой интенсивности при использовании этих методов возможна недооценка рисков опасных гидрологических явлений. Поэтому разработка новых методов оценки максимальных гидрологических характеристик стока в паводкоопасных регионах страны является приоритетной задачей.

Целью данной работы является оценка возможности применения метода детерминированного гидрологического моделирования для расчета максимальных характеристик стока малых рек Черноморского побережья Кавказа как при наличии наблюдений за стоком для уточнения и корректировки результатов, так и при отсутствии наблюдений за стоком для возможной минимизации последствий, связанных с ГОЯ.

В рамках работы были поставлены и решены следующие **задачи**:

- сбор, анализ и обобщение суточных гидрометеорологических данных;
- сбор, анализ и обобщение часовых гидрометеорологических данных для периодов прохождения максимальных расходов воды для исследуемых водосборов;
- параметризация гидрологической модели «Гидрограф» для изученного бассейна р. Туапсе (определение основных свойств почвенно-растительного покрова и подстилающей поверхности, систематизация данных для задания почвенных колонок в оболочку модели);

² <http://www.geo.ru/ekologiya/peregretoe-more>

- расчеты стока р. Туапсе на суточном интервале за продолжительный период (48 лет) и оценка эффективности моделирования;
- расчеты срочных (1-часовых) расходов катастрофических паводков 1991, 2005, 2010 гг. в бассейне р. Туапсе с использованием детальных данных об осадках;
- сравнение полученных результатов с «наблюденными» величинами;
- параметризация гидрологической модели «Гидрограф» для неизученного бассейна р. Цемес;
- верификация разработанного набора параметров модели на изученных водосборах рек Дюрсо, Адерба и Вулан;
- детерминированное моделирование процессов формирования стока неизученного водосбора р. Цемес;
- расчеты срочных (1-часовых) расходов катастрофических паводков 1988, 2002 и 2012 гг. в бассейне р. Цемес с использованием данных pluviографов;
- расчет максимальных расходов воды дождевых паводков обеспеченностью $P = 1; 2; 5; 10\%$ согласно рекомендациям СП-33-101-2003 (2004) для р. Цемес и сравнение их со значениями, полученными по модели «Гидрограф».

Актуальность настоящей работы состоит в усовершенствовании методов расчета максимальных характеристик стока в паводкоопасных регионах страны в условиях нестационарности окружающей среды.

Глава 1. Гидролого-гидрографическое описание объектов исследования, включая физико-географические аспекты

В качестве объектов исследования выбраны два наиболее уязвимых по отношению к прохождению катастрофических паводков водосбора изученной реки Туапсе (351 км²) и неизученной реки Цемес (82,6 км²). В качестве вспомогательных водосборов для верификации параметров модели для р. Цемес выбраны еще три изученных водосбора рек Дюрсо (51,9 км²), Вулан (265 км²) и Адерба (59,7 км²), расположенные на Черноморском побережье Северного Кавказа на территории Краснодарского края (табл. 1).

Таблица 1.

Водосборы исследования.

Название водного объекта	Код поста	Площадь, км ²	Период	
р.Дюрсо - свх Абрау-Дюрсо	82003	51.9	26.12.1945	31.12.1983
р.Адерба - пос.Светлый	82005	59.7	09.02.1966	Действ.
р.Вулан - к.п.Архипо-Осиповка	82010	265	24.01.1917	Действ.
р.Туапсе - г.Туапсе	82013	351	04.10.1913	Действ.
р.Цемес – г.Новороссийск	-	82.6	-	-

Бассейны рассматриваемых рек располагаются на южном склоне Большого Кавказа. Равнинные участки здесь невелики, разбросаны разорванно и занимают низовья речных долин. В Туапсинском районе горные вершины не поднимаются выше 975 м (гора Лысая), а в районе Новороссийска — 400 м. Далее к северо-западу предгорья переходят в приморскую равнину Анапского района.

Климат Черноморского побережья неодинаков в его западной и восточной части. Территория полосы Анапа – Туапсе характеризуется сухим субтропическим климатом, а полосы Туапсе – Сочи влажным субтропическим. Основным отличием является годовое количество осадков, значительно увеличивающееся с запада на восток, а также амплитуда колебания температуры воздуха. Основная доля осадков выпадает в зимний период. Метеорологические станции, данные которых использованы в данной работе приведены в таблице 2, а основные характеристики климата приведены в таблице 3.

Таблица 2.

Данные метеостанций.

Индекс	Метеостанция	Период	Высота, м
37005	Абрау-Дюрсо	1966-1988	93
37004	Геленджик	1966-2015	4
37017	Горный	1966-2014	324
37009	Джубга	1966-2013	21
37003	Мархотский перевал	1966-1983	432
37000	Новороссийск	1966-2014	7
37018	Туапсе	1977-2014	41

Таблица 3.

Климатические характеристики.

Метеостанция (высота) / параметр	Туапсе	Горный	Мархотский перевал	Геленджик
Среднегодовая температура, °С	13, 9	10,1	9,2	13,1
Сумма осадков, мм	1436	1720	903	754

Район от Анапы до Туапсе покрыт преимущественно широколиственными дубовыми и буковыми, а также смешанными лесами, на территориях выше 800-900 м произрастают еловые леса, на низкогорных территориях в районе Геленджика и далее к северу и северо-западу встречаются разнотравно-дерновинно-злаковые степи (рис. 1).

Почвенный покров в районе города Анапы выражен каштановыми почвами. Далее на юго-востоке широкой полосой, захватывая предгорья и низкогорья, до города Туапсе протянулись перегнойно-карбонатные почвы. Севернее – в полосе среднегорий они переходят в горнолесные почвы.

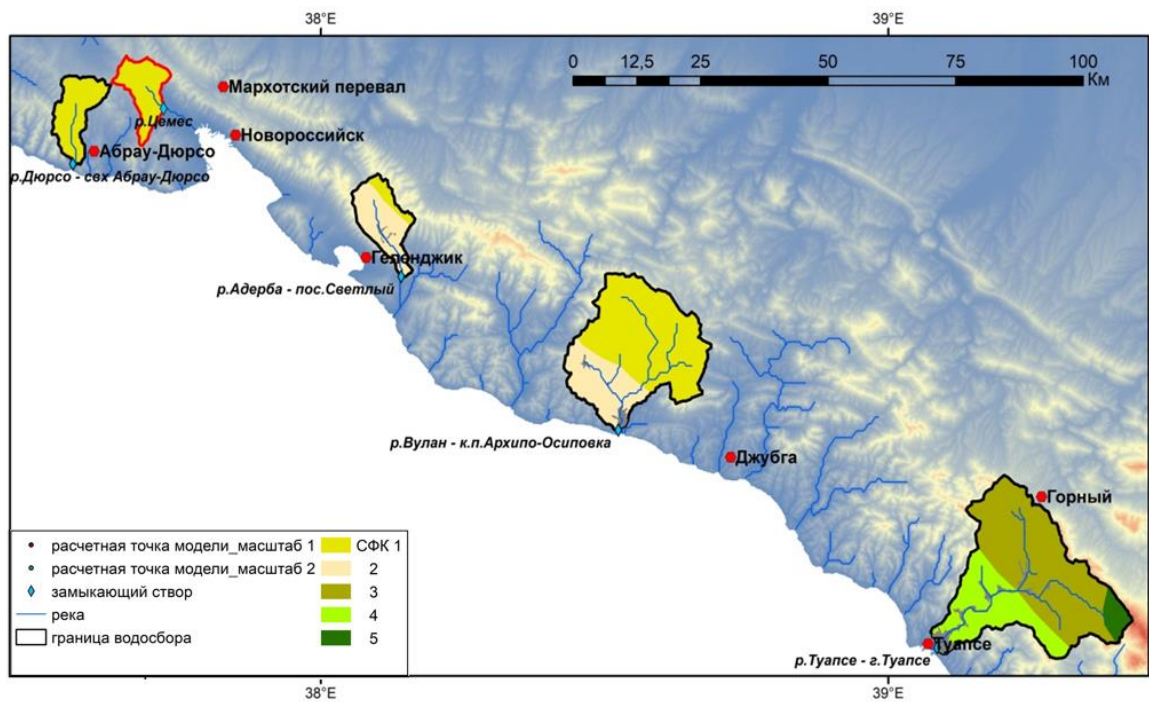


Рисунок 1. Объекты исследования (СФК 1 – дубовые леса, 2 – степи, 3 – смешанный лес, 4 – дубово-грабовый лес, 5 – еловый лес).

В гидрологическом отношении Черноморское побережье расчленено на многочисленные мелкие водосборные бассейны. Реки характеризуются большими уклонами и часто имеют вид горных ручьев, каскадами ниспадающих с гор. Исследуемые реки имеют преимущественно дождевой тип питания с характерным паводковым режимом стока (рис. 2). Снежный покров в бассейнах реки на полосе Анапа – Туапсе крайне неустойчив, при таянии которого не наблюдается ярко выраженного половодья. Снег накапливается только в частях бассейнов с отметками выше 1000 м. Для этих рек типичны паводки, которые часто бывают в холодный период года. Летом паводки тоже наблюдаются, но реже. Межень не продолжительна, поскольку иногда прерывается ливневыми паводками. При этом, благодаря специфическим условиям формирования стока, паводки на рассматриваемых реках характеризуются кратковременным и резким подъемом и спадом уровня, превращаясь в бурные потоки, приносящие колоссальные разрушения.

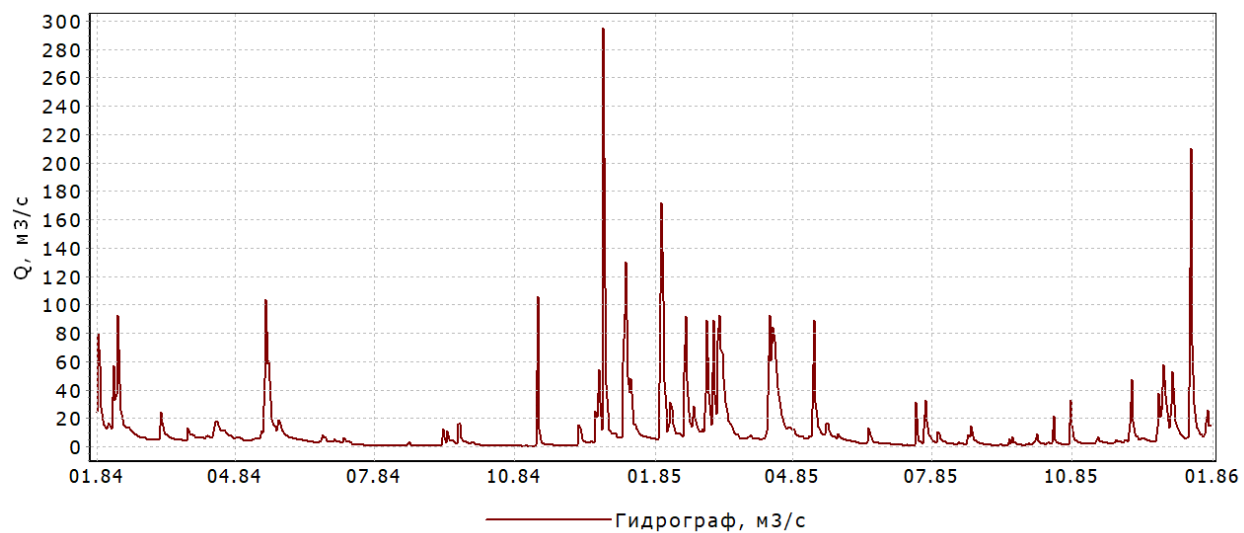


Рисунок 2. Характерный гидрограф р.Тупсе – з.Тупсе 1984-1985 гг.

Глава 2. Гидрологическая модель «Гидрограф»

2.1. Общие сведения

Процесс формирования стока представляет собой сложный многофакторный процесс. В работе (Виноградов Ю. Б., Виноградова Т. А., 2008) под процессом формирования стока понимается не только непосредственное появление воды, способной к дальнейшему стеканию, а весь комплекс определенной группы частных процессов, которые все вместе составляют наземную часть гидрологического цикла. В настоящее время для исследования процессов формирования стока создаются и используются математические модели, предусматривающее наибольшее приближение описания явлений к действительности. Модели делят на стохастические, основанные на понятиях теории вероятностей и математической статистики, и детерминированные, способные обобщать, упорядочивать всю существующую информацию, которой располагает современная теоретическая и экспериментальная гидрология (Виноградов Ю. Б., Виноградова Т. А., 2008).

В данной работе использовалась детерминированная гидрологическая модель «Гидрограф», разработанная Ю. Б. Виноградовым (Виноградов Ю. Б., Виноградова Т. А., 2010), описывающая процессы формирования стока, представляющая собой математическую систему с распределенными параметрами. В модели описаны склоновая и русловая трансформация стока, поверхностное, почвенное, подземное стокообразование, динамика почвенных вод, фазовые переходы в почве. Особенностью модели является замена калибровки априорным назначением величин ее параметров, которые в ходе анализа результатов моделирования могут быть откорректированы. На рис. 3 представлена блок-схема модели «Гидрограф».

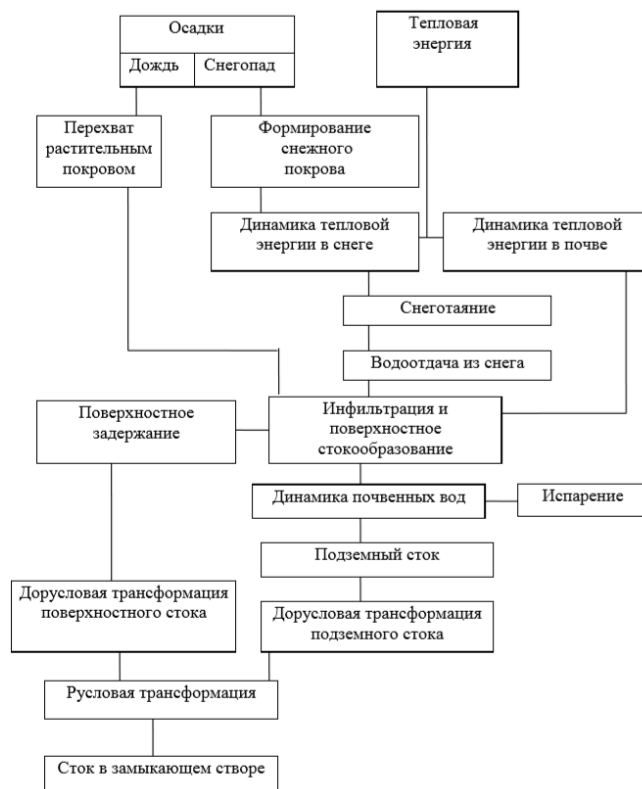


Рисунок 3. Блок-схема детерминированной модели гидрограф (Виноградов, Виноградова, 2010).

Модель уже зарекомендовала себя работоспособным инструментом в различных условиях формирования стока (Нестерова и др., 2018; Semenova O. et al, 2013). Модель нетребовательна к входной информации, которая представляет собой суточные данные о температуре и влажности воздуха и количестве осадков, что позволяет применять ее на малоизученных речных бассейнах.

2.2. Репрезентативные точки и стокоформирующие комплексы

В модели используется гексагональная сетка, обладающая свойством равноотдаленности каждой точки от шести соседних. Равномерно покрывающие площадь бассейна точки и отстающие друг от друга на одинаковое расстояние, в рамках модели называются репрезентативными (РТ) (рис. 4).

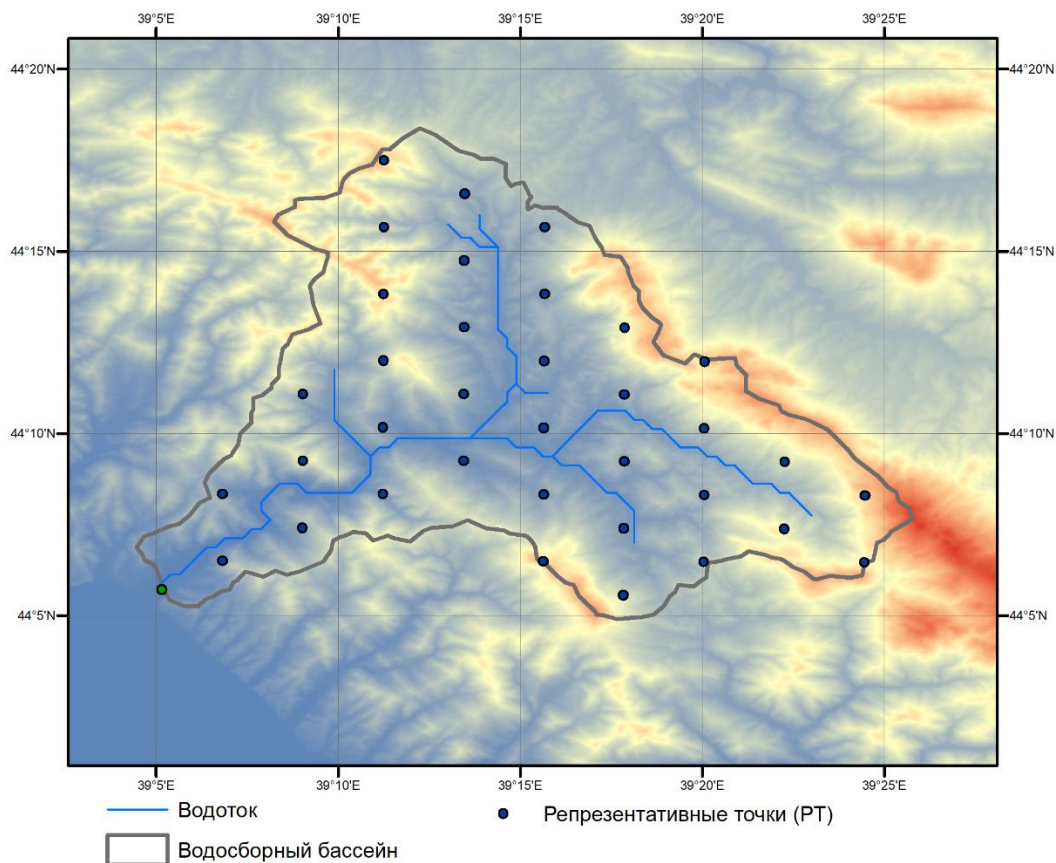


Рисунок 4. Схема расположения РТ внутри водосбора.

Каждой точке соответствует определенная единичная площадь. Количество РТ, достаточное для покрытия бассейна определяется формулой:

$$n = kF^{0.3}(1 + \Delta H), \quad (1)$$

где F – площадь бассейна (км^2), ΔH – разность высот в бассейне (км); значение k в зависимости от важности задачи, сложности объекта, пестроты ландшафтов, наличия информации, особенно метеорологической, может колебаться от 0,5 до 1,5.

Каждой РТ соответствует подкомандная единичная площадь $F_{\text{ед.}}$, размером

$$F_{\text{ед.}} = F_{\text{бас.}} / N_{\text{РТ}}, \quad (2)$$

где $F_{\text{бас.}}$ – площадь бассейна, км^2 , $N_{\text{РТ}}$ – количество репрезентативных точек.

Для оценки параметров в пределах исследуемых бассейнов выделяются условно однородные ландшафты, так называемые стокоформирующие комплексы (СФК), по которым производится систематизация параметров модели. СФК – часть территории речного бассейна, условно однородная в гипсометрическом, геоморфологическом, геологическом, педологической (почвоведческом), геоботаническом, экологическом и, конечно,

гидрологическом отношении. Предполагается, что в его пределах процесс формирования стока достаточно единообразен, а его количественные характеристики могут быть осреднены. При выделении СФК соотносятся друг с другом почвенные, растительные и ландшафтные карты и выделяются однородные зоны. Общая методика выделения СФК описана в работе (Виноградов, Ю. Б., Виноградова, Т. А., 2010).

2.3. Параметры репрезентативных точек

В качестве параметров РТ в модели рассматриваются климатические параметры, интерполяционные коэффициенты, параметры почвы.

Климатические параметры включают следующие:

- a) *Годовая сумма осадков (мм)* вводится для уточнения интерполируемых осадков в РТ из метеорологических станций. Для чего назначается среднегодовое количество осадков для каждой РТ, которое может определяться по связи количества осадков с высотой местности. Если назначенное на РТ количество осадков равно количеству осадков на метеостанции, откуда интерполируется метеорологическая информация, то ежедневные суммы осадков меняться не будут. В случае, если среднегодовое количество осадков на РТ отличается от такового на метеостанции, интерполируемая сумма осадков за день будет нормироваться.
- b) *Способ расчета градиента температуры* представляет выбор одного из возможных способов уточнения интерполируемой температуры воздуха: градиента нет, либо он есть и тогда температура корректируется в зависимости от градиента температуры.
- c) *Среднегодовой дефицит влажности воздуха (ГПа или Мб)* можно рассчитать автоматически в оболочке модели в зависимости от заданных на метеостанциях значений и интерполирующих коэффициентов.
- d) *Среднегодовая относительная влажность воздуха в долях от единицы*, также рассчитывается автоматически в оболочке модели в зависимости от заданных на метеостанциях значений и интерполирующих коэффициентов.
- e) *Годовая прозрачность атмосферы на уровне моря* зависит от содержания в воздухе водяного пара и примесей. Изменяется от 0.3 (высокая прозрачность) до 0.6 (низкая прозрачность) и назначается согласно справочным данным.
- f) *Амплитуда прозрачности атмосферы* характеризует, насколько отклоняется годовая прозрачность атмосферы на уровне моря от своего среднего значения в течение года. Изменяется от 0.05 до 0.2 и тоже назначается согласно справочным данным.

В качестве параметров РТ назначаются интерполяционные коэффициенты (ИП) для температуры и влажности воздуха, количества осадков, влажности почвы, облачности и потенциального испарения. Это производится путем выбора метеостанций, которые будут использоваться для интерполяции его входных значений в ту или иную РТ. Интерполяционные коэффициенты в долях от единицы показывают вклад каждой метеостанции. Они рассчитываются по следующим формулам:

$$K1 = D / (C + D), \quad (3)$$

$$K2 = A / (A + B) * C / (C + D), \quad (4)$$

$$K3 = C / (C + D) * B / (A + B), \quad (5)$$

где А, В, С, D - стороны треугольников.

Интерполяционные коэффициенты рассчитываются автоматически в оболочке модели в зависимости от заданных условных координат. Для этого необходимо, чтобы РТ находилась в треугольнике между тремя использующимися метеостанциями, а не за его пределами. Если это невозможно, то вместо трех используются одна или две метеостанции для интерполяции. Важно, чтобы сумма ИК должна быть равна 1.

3.3. Параметры стокоформирующих комплексов

Параметры СФК представляют собой параметры почвенно-растительного покрова, от которых напрямую зависит формирование стока. Параметры растительного покрова представлены в таблице 4. Почвенные параметры приведены в таблице 5.

Таблица 4.

Описание параметров растительного покрова

№	Параметр	Определение	Возможные значения
1	Затененность поверхности почвы кронами деревьев	Доля площади СФК, недоступной для попадания прямых солнечных лучей, зависит от сомкнутости и прозрачности крон. Величина назначается по конкретным измерениям на местности, по литературным данным, по экспертным оценкам.	Максимальное значение затененности (1.0) дает сомкнутый еловый лес; минимальное значение (до 0.01) – редкостоящие отдельные мелколиственные деревья
2	Максимальная емкость перехвата жидких осадков растительным покровом	Водоудерживающая способность растительного сообщества, определяющая потенциальную возможность всех ярусов растительности данного СФК задерживать некоторый слой дождевой влаги	Зависит от типа растительности (например, для ели – 5 мм, для высоких трав – 1.8-2.2 мм).
3	Минимальная емкость перехвата жидких осадков растительным покровом		При отсутствии специальных данных принимается 20 - 35% от максимальной емкости перехвата.
3	Альbedo почвы (подстилающей поверхности)	Величина, характеризующая отражательную способность любой поверхности, связанную с её физическими свойствами	Изменяется от 0 до 1. Темные почвы – 0.05, свежий снег – 0.9.
4	Коэффициент испаряемости	-	Лесной водосбор, пашня: максимальное значение – 0,6 , минимальное – 0,2 .
5	Коэффициент испарения при максимальном развитии растительности	-	Лесной водосбор, пашня: 0,3
6	Фенологические даты	Описывают сезонное развитие растительного покрова путем его аппроксимации трапецией и соответствуют следующим этапам развития растений	Первая дата – начало вегетации; вторая – начало максимальной фазы развития растительного покрова; третья – конец максимальной фазы развития растительного покрова; четвертая – конец вегетационного периода.

Таблица 5.

Описание параметров почвенного покрова

№	Параметр	Описание
1	Плотность твердой фазы почвы, кг/м ³	отношение массы ее твердой фазы к массе воды в том же объеме при 4 °С. Плотность твердой фазы почвы обычно колеблется от 2000 до 3000 кг/м ³ и зависит от механического состава и содержания органического вещества.
2	Пористость, доля от единицы	Суммарный объем всех пор между частицами твердой фазы почвы. Пористость численно равна полной влагоемкости – наибольшему количеству влаги, которое может содержаться в почве при заполнении всех пор водой. У развитых почв пористость обычно колеблется между 30 и 60 %. Наибольшая пористость (80—90%) наблюдается в лесных подстилках, травяном войлоке, торфах.
3	Максимальная водоудерживающая способность	Наибольшее количество капиллярно-подвешенной влаги, которое почва способна удержать после ее обильного увлажнения и свободного стекания избытка влаги. В песках МВС равна 0.03—0.05%, в суглинистых и глинистых почвах 0.18—0.23, а в хорошо суглинистых почвах, обладающих развитой структурой, до 0.35—0.38. МВС органогенных горизонтов (торфа, напочвенного покрова) может достигать 0.8 – 0.9.
4	Коэффициент фильтрации, мм/мин	Слой воды, фильтрующийся через горизонтальное сечение почвенной колонки за 1 минуту в условиях насыщенной почвы.
5	Удельная теплоемкость почвы, Дж/(кг град)	Количество тепловой энергии, необходимой для повышения температуры одного килограмма почвы на один градус
6	Удельная теплопроводность почвы (коэффициент теплопроводности), Вт/(м град)	Количество теплоты, проходящее за секунду через 1 м ² изотермической поверхности при единичном температурном градиенте.
7	Показатель влияния льдистости на фильтрацию	Используется как показатель степени в формуле расчета коэффициента фильтрации мерзлой почвы.
8	Температура почвы на глубине 1.6 или 3.2 м	Используется в качестве граничного условия в расчете динамики тепла в почве.
9	Влажность завядания, мм	Предел свободно перемещающейся и испаряющейся влаги. Почва не может испарять влагу ниже уровня влажности завядания.

Выходом из модели являются расходы воды расчетного шага сутки и менее в замыкающем створе, водные балансы территории, различные переменные состояния водосборов, что позволяет оценивать результаты моделирования природным процессам. Расчетный интервал модели составляет сутки и менее. Для расчетов использовалась комплексная программа распределенной гидрологической модели «Гидрограф», разработанная О. М. Макарьевой (Свидетельство, 2018).

Глава 3. Расчет стока для изученной реки Туапсе

3.1. Параметризация модели «Гидрограф» для бассейна р. Туапсе

При подготовке к моделированию была проведена схематизация водосбора р.Туапсе, выделены четыре стокоформирующих комплекса (СФК): смешанный, дубово-грабовый, еловый лес и городские агломерации, систематизированы параметры модели для основных ландшафтов (Ландшафтная карта, 1980; Рис.2-3). Водосбор был покрыт регулярной гексагональной сеткой, узлами которой являются репрезентативные точки (РТ), в которые происходит интерполяция метеорологических величин при расчете. Для всех РТ определены характеристики: координаты, высота, уклон, ориентация склона. Для каждого СФК оценены параметры склонов, растительности, подземного питания, разработаны почвенные профили на основе информации о типах почв и их свойствах (Единый реестр, 2018; Дрыгина Т.Ф., 1967). Каждый профиль разбит на 10 расчетных слоев почвы (РСП) по 10 см. Профиль имеет уникальный набор параметров, который позволяет описать вертикальное движение влаги в разрезе почвенной колонки. В число таких параметров входят: плотность почвы или ее удельная масса; пористость, находящаяся в зависимости от удельной и объемной масс почвенных частиц; максимальная водоудерживающая способность, которая в среднем для данных профилей изменялась от 50 мм в первом РСП до 20 мм в нижнем; параметр влажности завядания; удельная массовая теплоемкость и удельная массовая теплопроводность почвы; коэффициент фильтрации, являющийся мерой водопроницаемости почвенного профиля. Для СФК, характеризующего городские условия коэффициент фильтрации принят 0 мм/мин.

Входной метеорологической информацией являются суточные данные по температуре и влажности воздуха и количеству выпавших осадков по двум метеорологическим станциям, расположенным в пределах водосбора или в непосредственной близости – м/с Горный (324 м) и м/с Туапсе (2 м). Интерполяция метеорологических параметров производилась в РТ из метеорологических станций методом нормирования суточных сумм осадков по их годовой среднегодовой величине. На основе выявленных локальных зависимостей осадков от высоты местности производилось предварительное назначение годовых норм осадков для всех РТ. Для построения зависимостей количества осадков от высоты местности использовались суточные данные на метеорологических станциях и данные о среднегодовых годовых суммах осадков на метеорологических станциях и постах за исторический период наблюдений (Справочник по климату, 1966; Метеорологический ежемесячник, 1964-1983).

3.2. Результаты моделирования с суточным расчетным шагом

Первым этапом расчета было проведение непрерывного моделирования процессов формирования стока с суточным шагом для бассейна р. Туапсе за период с 1966 по 2013 гг. Для оценки эффективности расчетов стока воды ряды рассчитанных расходов сравнивались с наблюдаемыми значениями на основе величины критерия Нэша-Сатклиффа (NS) (Nash J.E. et al., 1970). На рис. 5 представлено графическое сравнение результатов моделирования – примеры хороших ($NS > 0,60$), удовлетворительных ($0,30 < NS < 0,60$) и неудовлетворительных ($NS < 0,30$) результатов. Среднее квадратическое отклонение (СКО) за весь период расчета составило $12,6 \text{ м}^3/\text{с}$.

Расхождение значений наблюдаемых и рассчитанных слоев стока составляет 38 мм или чуть более 3 %. Рассчитанные значения осадков и испарения составляют 1805 и 567 мм соответственно. Таким образом, на основе анализа критерия NS и сравнения рассчитанных и наблюдаемых элементов водного баланса сделан вывод об удовлетворительных результатах моделирования.

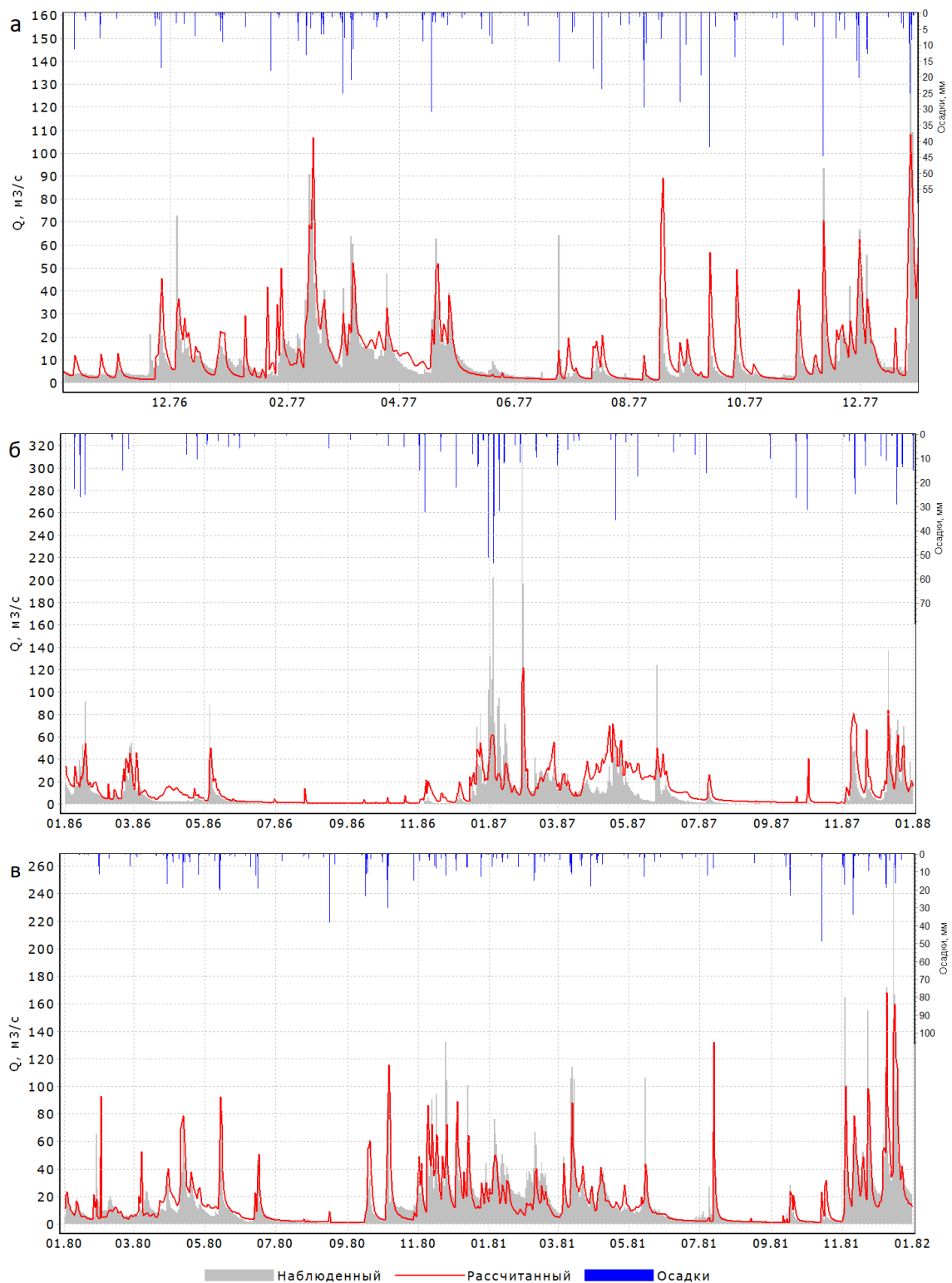


Рисунок 5. Суточные рассчитанные и наблюдаемые гидрографы стока р. Туапсе — г. Туапсе, m^3/s : а — $NS = 0,78$ (высокий), б — $NS = 0,20$ (низкий), в — $NS = 0,60$ (удовлетворительный).

3.3. Моделирование выдающихся паводков на р. Туапсе

Как уже было сказано, ОГЯ на территории Черноморского побережья формируются в основном в результате выпадения локальных осадков экстремальной интенсивности. В настоящее время в РФ наблюдения за осадками производятся каждые 12 часов, что в условиях формирования максимальных расходов из-за выпадения осадков высокой интенсивности не позволяет использовать стандартную метеорологическую информация для оценки срочных расходов воды. Но значительная часть метеорологических станций оборудована плювиографами, сведения по которым публикуются в метеорологических ежемесячниках. Таким образом, было решено для моделирования выдающихся паводков использовать детальные данные по осадкам, зарегистрированные плювиографами, осредненные до равномерного часового интервала.

1991 год. Расход воды при прохождении паводка 1 августа 1991 года на р. Туапсе был оценен по меткам высоких вод значениями 635 и 2300 м³/с среднесуточный и срочный соответственно (Панов и др., 2012). По данным плювиографов на станциях Горный и Туапсе общее количество осадков за период с 1:40 ночи до 8:30 утра 1 августа 1991 года составило 148,1 и 65,0 мм соответственно. Средние и максимальные значения интенсивности осадков достигли 0,62 и 1,47 мм/мин для станции Горный и 0,17 и 1,17 мм/мин – для станции Туапсе. По имеющимся данным об осадках было проведено моделирования на часовом интервале. При анализе водного баланса стало понятно, что рассчитанный слой осадков для всего водосбора составил 155 мм, что практически совпадает с наблюдаемым суточным слоем стока 156 мм (согласно опубликованному суточному расходу) (рис. 6).

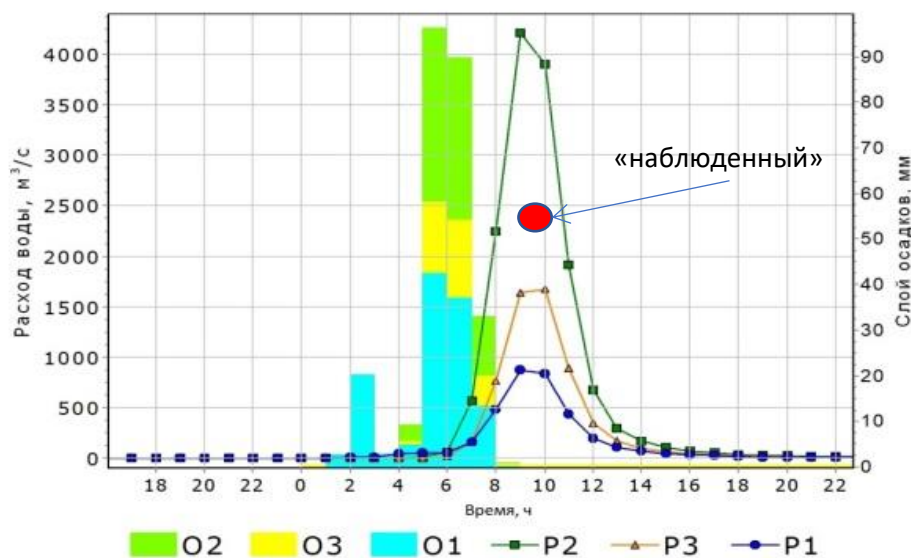


Рисунок 6. Результаты моделирования паводка на р. Туапсе, 31 июля — 1 августа 1991 г.; O и P 1, 2, 3 — рассчитанные слои осадков и гидрографы паводкового стока соответственно для вариантов расчета 1–3.

Максимальный рассчитанный 1-часовой расход воды составил $890 \text{ м}^3/\text{с}$, суточный — $182 \text{ м}^3/\text{с}$, рассчитанный слой стока за сутки — 45 мм. Рассчитанный слой стока оказался почти в три раза ниже наблюдаемого. При анализе результатов водного баланса получили, что после длительного бездождевого периода потери на насыщение влагой почвы составили 82 мм, суммарные потери на испарение — 7 мм, а приток в подземные и почвенные стоковые элементы — 18 мм. Таким образом, по модельным данным для формирования наблюдаемой величины стока должно было выпасть в два раза больше осадков.

Однако в работе (Панов В. Д. и др., 2012) сообщается, что основной объем паводка был сформирован левыми притоками – рр. Пшенахо и Малое Псеушхо, а в (Ткаченко Ю.Ю., Волосухин В.А., 2013) приводятся суммы осадков для метеорологического поста Татьянаовка – 241 мм, и на водомерном посту с. Горное на р. Пшиш – 302 мм. Таким образом, расхождения данных о величине осадков на двух пунктах наблюдений (метеорологическая станция Горный (148,1 мм) и гидрологический пост с. Горное (302 мм)), находящихся в одном поселке, составляют почти 50 %. Поэтому было решено провести два дополнительных варианта расчета с использованием данных об осадках, описанных выше.

Во втором варианте использования данных по осадкам были использованы данные по посту Татьянаовка (241 мм) и с. Горное (302 мм). Для третьего варианта дополнительно к исходным данным pluвиографов использовалась сумма осадков на посту Татьянаовка. Срочный и суточный расходы по второму и третьему варианту составили $4\ 200/600$ и $1\ 680/250 \text{ м}^3/\text{с}$ соответственно. Таким образом, третий вариант распределения осадков позволяет воспроизводить максимальные расходы, близкие к значениям, определенным по меткам высоких вод.

Результаты расчетов по трем вариантам входных данных представлены на рисунке 6 и в таблице 6.

Таблица 6.

Рассчитанные и наблюдаемые величины расходов воды и слоев стока катастрофических паводков в бассейне р. Туапсе

Дата	Рассчитанный					Наблюденный			
	Q _{час} , м ³ /с	Q _{сут} , м ³ /с	Н _{стока}	Н _{осадков}	М _{час} , м ³ /км ² *с	Q _{сроч.}	Q _{сут} , м ³ /с	Н _{стока}	М _{час} , м ³ /км ² *с
01.08. 1991 (1 вариант)	890	182	155	45	2.54	2300	635	156	6.55
01.08. 1991 (2 вариант)	4200	600	242	148	12.0				
01.08. 1991 (3 вариант)	1680	250	180	62	4.79				
17.06. 2005	1316	191	206 (17- 18.06)	82 (17- 18.06)	3.75	-	-	-	-
16.10. 2010	375	113	72	33	1.07	1630	579	142	4.64

2005 год. При прохождении паводка в июне 2005 года на метеостанции Горный было зафиксировано рекордное количество осадков – 291 мм выпало за 13 часов при максимальной интенсивности 1,9 мм/мин, а на метеостанции Туапсе выпало 48,8 мм за 6,5 часов. Суммарно за период 17-24 июня выпало 444 и 81,5 мм для м/с Горный и Туапсе соответственно.

В период 1997-2008 гг. наблюдения за расходами воды на гидрологическом посту р. Туапсе не проводились. Таким образом, неизвестно, насколько локальны были выпавшие 17 июня осадки, а также какой величины паводок они вызвали. Однако, в ночь с 21 на 22 июня 2005 года был зафиксирован сход селевого потока на железнодорожное полотно в районе разъезда Водопадный Северо-Кавказской железной дороги на участке Туапсе-Сочи, который был обусловлен выпадением в предшествующий период большого числа осадков (Колтерманн и др., 2012).

На рисунке 7 приводится график рассчитанного гидрографа стока, элементов водного баланса и переменных состояний бассейна р. Туапсе за период 16–21 июня 2005 года. Максимальные рассчитанные 1-часовой и суточный расходы воды 17 июня 2005 года достигли соответственно 1316 и 191 м³/с. Согласно результатам моделирования, количество выпавших на водосбор осадков в период 17-18 июня составило 206 мм, слой стока – 82 мм (таблица 6).

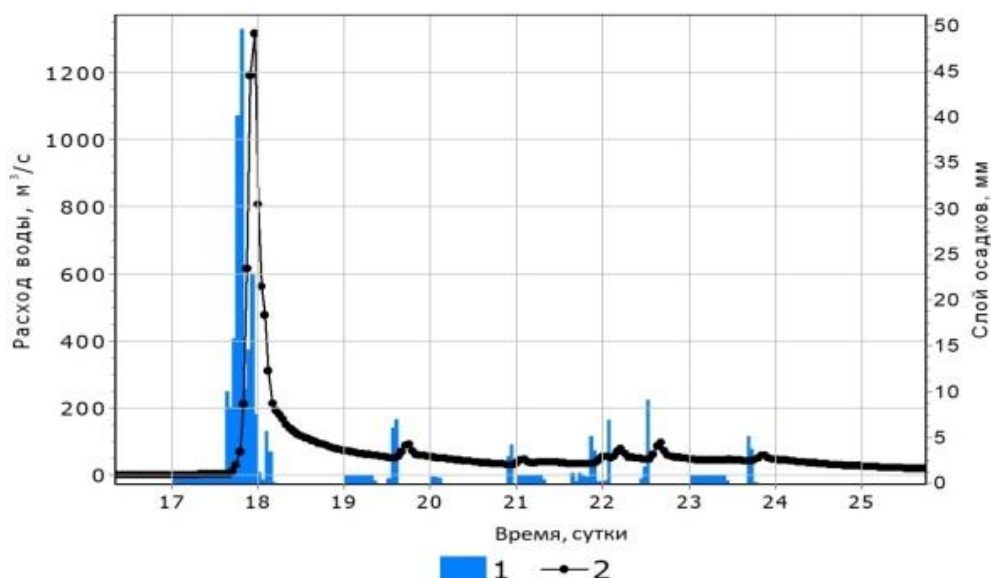


Рисунок 7. Результаты моделирования паводка на р. Туапсе 16–23 июня 2005 г.
 Обозначения: 1 — 1-часовые осадки (мм), 2 — рассчитанный 1-часовой гидрограф стока (м³/с)

2010 год. В октябре 2010 года в результате выпадения ливней произошло крупнейшее наводнение. Данных pluviографов на этот паводок не оказалось, однако по данным (Панов В. Д. и др., 2012), подъем уровня начался в 23 часа 15 октября, а максимальные значения стока были достигнуты к 2-3 часам 16 октября, поэтому можно предположить, что осадки выпали в течение нескольких часов. 16 октября на метеостанциях Горный и Туапсе выпало 93,3 и 43,9 мм соответственно. Наблюдаемый суточный и срочный расход составили 579 и 1630 м³/с.

Расчет расхода паводка 16 октября 2010 г. на р. Туапсе проведен на основе суточных данных об осадках на метеорологических станциях Туапсе и Горный, но продолжительность их выпадения принята равной два часа со средней интенсивностью 0,4 и 0,2 мм/мин (рис. 8).

Средний по водосбору рассчитанный слой осадков составил 56 мм. Наблюдаемый слой стока составил 142 мм. Рассчитанные срочный и суточный расходы воды достигли 375 и 113 м³/с соответственно. Слой стока за сутки составил 28 мм, из них 8 мм — поверхностный. Таким образом, 16 октября наблюдаемый слой стока превысил слой осадков в 2,5 раза.

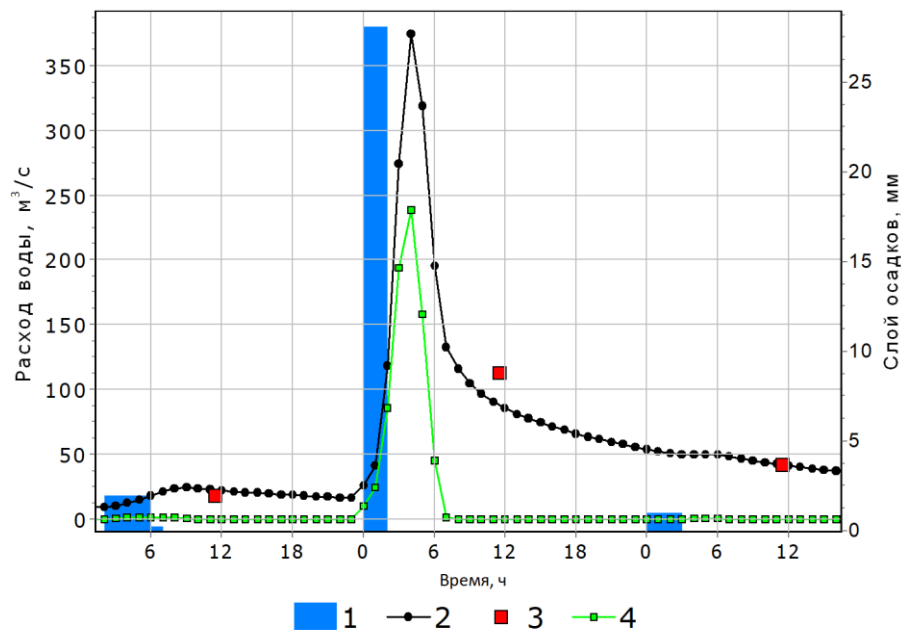


Рисунок 8. Результаты моделирования выдающегося паводка на р. Туапсе, 15–16 октября 2010 г. Обозначения: 1 — 1-часовые осадки (мм), 2 — 1-часовой гидрограф стока ($\text{м}^3/\text{с}$), 3 — суточный гидрограф стока ($\text{м}^3/\text{с}$), 4 — гидрограф поверхностного стока ($\text{м}^3/\text{с}$).

На рис. 9 представлен график сравнения суточных рассчитанных и наблюдаемых гидрографов стока. В период с января по май рассчитанные и наблюдаемые величины совпадают удовлетворительно как по амплитуде, так и по фазе. Начиная с паводка 15–16 октября, наблюдаемые величины в разы превышают рассчитанные. В целом за период с 1 октября по 31 декабря в бассейне р. Туапсе по расчетам выпало 531 мм осадков, наблюдаемый и рассчитанные слои стока за тот же период составили 1 698 и 380 мм соответственно. Значительное расхождение элементов водного баланса, а также факт отсутствия наблюдений за стоком в течение 2011 и 2012 гг., позволяют высказать предположение о возможной невязке в опубликованных данных срочных и суточных расходов, а также всего периода наблюдений с 15 октября по 31 декабря 2010 г.

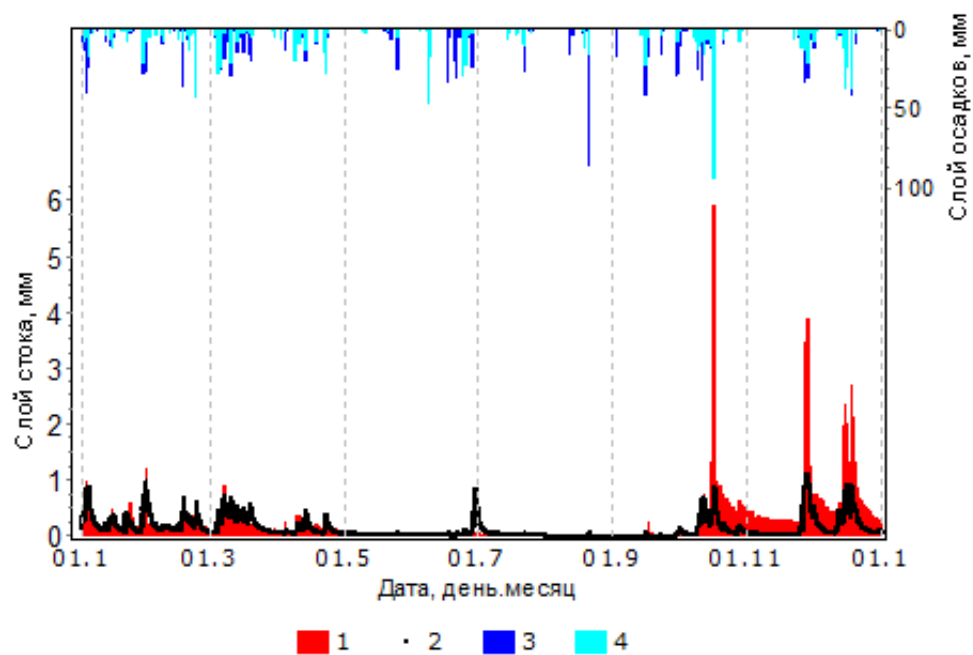


Рисунок 9. Осадки и сток в бассейне р. Туапсе (мм), 2010 г. 1 — наблюдаемый сток, 2 — рассчитанный сток, 3 — осадки на метеостанции «Горный», 4 — осадки на метеостанции «Туапсе».

Глава 4. Расчет стока для неизученной реки Цемес

4.1. Параметризация модели «Гидрограф» и верификация параметров для бассейна р. Цемес

В рамках работы для параметризации модели для неизученного водосбора р.Цемес было проведено непрерывное моделирование процессов формирования стока для трех изученных водосборов – р. Дюрсо р. Адерба и р. Вулан (рис. 1), расположенных в сходных условиях формирования стока на суточном временном интервале.

В качестве входной метеорологической информации были заданы суточные данные по температуре, влажности воздуха и количеству выпавших осадков по 5 метеостанциям исследуемого района: Новороссийск (7 м), Абрау-Дюрсо (93 м), Геленджик, (4 м), Мархотский перевал (430 м), Джубга (25 м). При интерполяции осадков из метеостанций на горные склоны суточные величины корректировались согласно высотному градиенту осадков. Для расчета величины градиента были использованы данные о среднемноголетних годовых суммах осадков на метеорологических станциях и постах за исторический период наблюдений. Принятый высотный градиент для района исследования составил 40 мм на 100 м.

Периоды расчета для каждого водосбора определялись наличием входной метеорологической и контрольной гидрологической информации. Результатами моделирования стали значения элементов водного баланса и гидрографы стока в замыкающем створе (таблица 7, рис. 10, 11).

Таблица 7.

Средние значения статистических критериев и элементов водного баланса для бассейнов рр. Дюрсо, Адерба, Вулан и Цемес.

Код поста	Река-створ	S	H_{cp}/H_m	Период	$Q_{сут}$	$Q_{сро, год}$	Q_r	H_n	H_p	P	E	NS _{med}	NS _{max} год
82003	р. Дюрсо – свх Абрау-Дюрсо	51.9	211/531	1966- 1977	24.3	38.3 1967	0.45	272	291	733	445	0.25	0.79 1966
82005	р. Адерба – поч Светлый	59.7	380/745	1977- 1997	63.0	178 1981	0.94	486	515	1081	565	0.30	0.64 1981
82010	р. Вулан – к.п. Архипо- Осиповка	265	209/742	1977- 2013	422	1050 1980	6.23	644	608	1149	543	0.36	0.61 1978
-	р. Цемес – г. Новороссийск	82.6	215/531	1977- 2013	-	-	-	-	330	833	503	-	-

где S – площадь водосбора, $км^2$; H_{cp} и H_m – средняя и максимальная высота водосбора, м; $Q_{сут}$ – максимальный суточный, наблюдаемый расход, $м^3/с$; $Q_{сро}$ – максимальный срочный расход воды, $м^3/с$ (год); Q_r – среднемноголетний наблюдаемый расход, $м^3/с$; H_n , H_p , P , E – среднемноголетние величины элементов водного баланса (мм): наблюдаемый и рассчитанный годовой слой стока, осадки, испарение; NS_{mes} и NS_{max} – медианные и максимальные значения коэффициента Нэша-Сатклиффа.

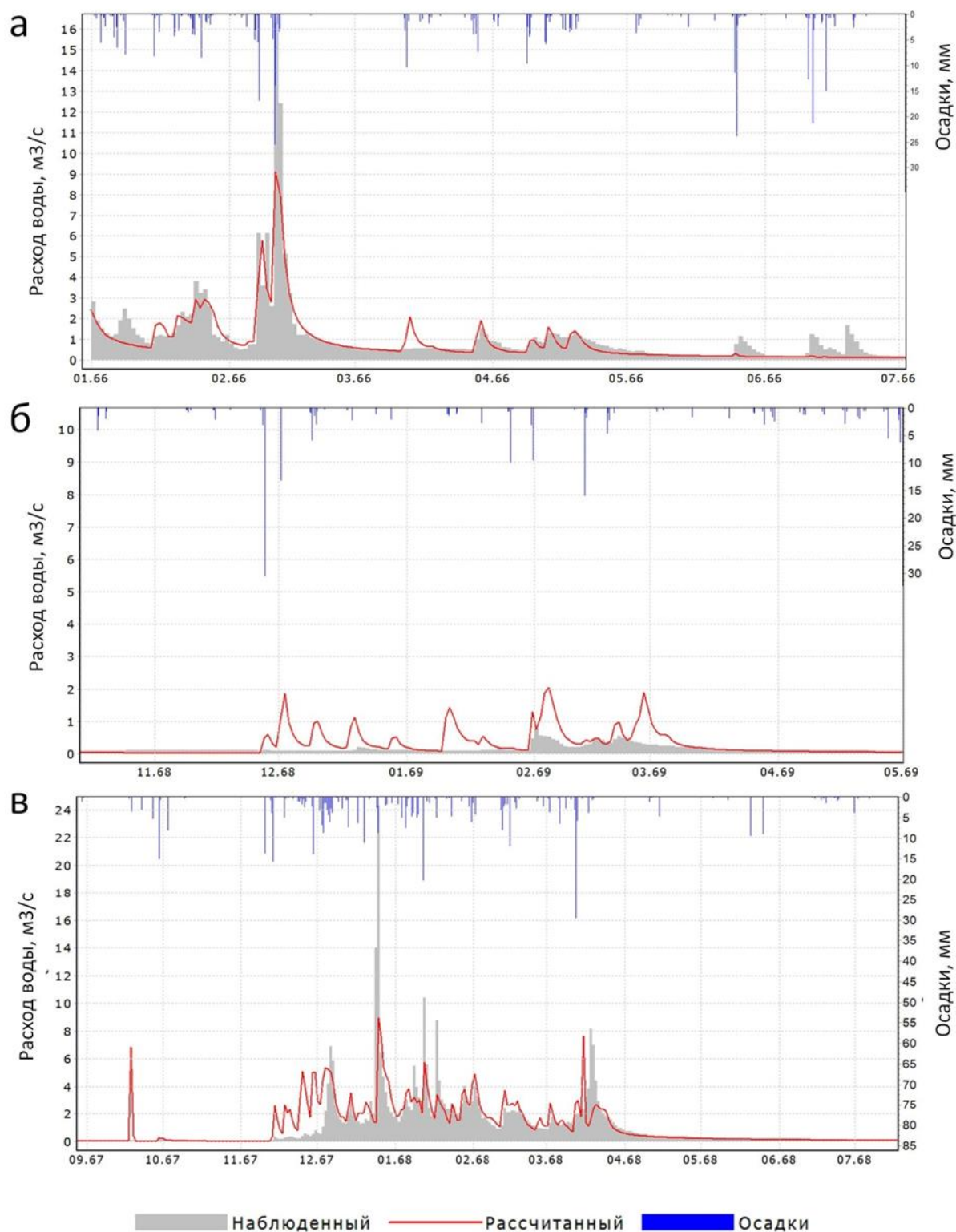


Рисунок 10. Суточные рассчитанные и наблюдаемые гидрографы стока р. Дюрсо – свх Абрау-Дюрсо, м³/с, а, б, в – примеры высокого, среднего и низкого значения NS.

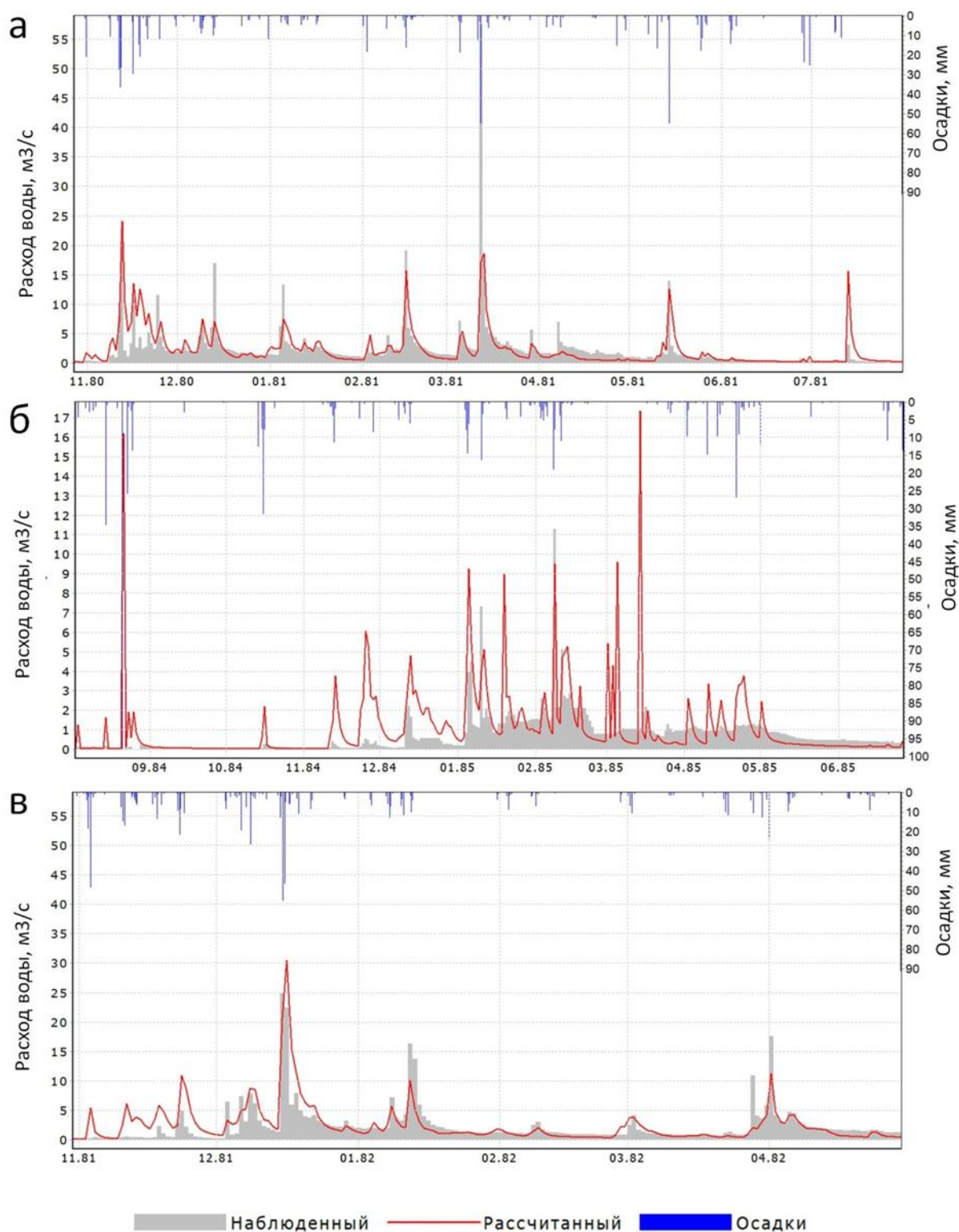


Рисунок 11. Суточные рассчитанный и наблюдаемый гидрографы стока р. Адерба – Светлый, м³/с; а, б, в – примеры высокого, среднего и низкого значения NS .

При оценке адекватности гидрологической модели на изученных водосборах возникли трудности, состоящие в том, что исследуемые бассейны значительно отличаются соотношением элементов водного баланса. Так, в бассейне р. Дюрсо, расположенном ближе

всех к бассейну р. Цемес, коэффициент стока составляет в среднем 0.37, в то время как для водосбора р. Адерба данная величина равняется 0.45, а для р. Вулан – 0.56. Поэтому оценка степени репрезентативности бассейнов для р. Цемес достаточно затруднительна. Однако результаты моделирования водного баланса являются удовлетворительными: для бассейнов наблюдается несовпадение рассчитанных и наблюдаемых годовых слоев стока в пределах от 19 до 36 мм, что составляет 6-7 % от среднегодовой величины наблюдаемого стока.

При оценке эффективности расчетов критерием Нэша-Сатклиффа (NS) ряды рассчитанных расходов воды сравнивались с имеющимися данными наблюдений за стоком. Медианные величины NS для суточных расходов воды колеблются от 0.25 до 0.36. Хотя максимальные значения NS в некоторые годы превышают 0.6-0.7, в целом, если оценивать результаты моделирования по принятым в мировой практике стандартным критериям (Moriasi et al., 2007), они должны быть признаны неудовлетворительными. Однако, при оценке результатов необходимо учитывать, что моделирование процессов формирования стока в бассейнах горных рек Дюрсо, Адерба и Вулан производилось с использованием входных метеорологических данных с единственной метеостанции (разной для каждого бассейна). Эти метеостанции расположены не только за пределами бассейна, но и на значительно более низкой абсолютной высоте. Например, для горного бассейна р. Адерба, средняя высота которого составляет 340 м, ближайшая метеостанция (Геленджик) находится на абсолютной высоте 4 м. Фактор нерепрезентативных данных об осадках частично обуславливает заниженные по сравнению с наблюдаемыми рассчитанные максимальные расходы воды (рис. 10, 11). Наличие данных хотя бы еще одной метеорологической станции, расположенной в горной части водосборов, позволяет существенно повысить качество моделирования гидрографов стока в исследуемом районе. Так значения NS для бассейна р. Туапсе, где при моделировании с суточным шагом использовались данные двух метеорологических станций (Туапсе и Горный), достигают величин 0.6. Поэтому в условиях неопределенности данных по осадкам результаты можно признать удовлетворительными.

4.2. Моделирование стока в бассейне р. Цемес с суточным расчетным шагом

Перенос параметров на неизученный водосбор р. Цемес позволил провести непрерывное моделирование стока за период с 1977-2013 гг. с суточным разрешением по данным метеорологической станции Новороссийск. Рассчитанные величины элементов годового водного баланса за период моделирования составили: осадки – 833, испарение – 503, сток – 330 мм. Максимальный рассчитанный суточный расход достиг значения 86,4 м³/с в период катастрофического паводка, прошедшего 20 июня 1988 года. Паводок с суточным слоем стока 90,4 мм был сформирован ливневыми осадками, суммарная величина которых составила 188 мм.

Для получения суточного расхода 1% обеспеченности была построена кривая вероятности суточных максимальных расходов для р. Цемес, полученная на основе результатов моделирования (рис. 12) (построение выполнено в программе HydroStatCalc – 2010 (Рождественский, А.В., Лобанова, А.Г., 2010) Экстраполяция кривой позволяет оценить расход 1% обеспеченности как 108 м³/с, а 0.1% – 183 м³/с.

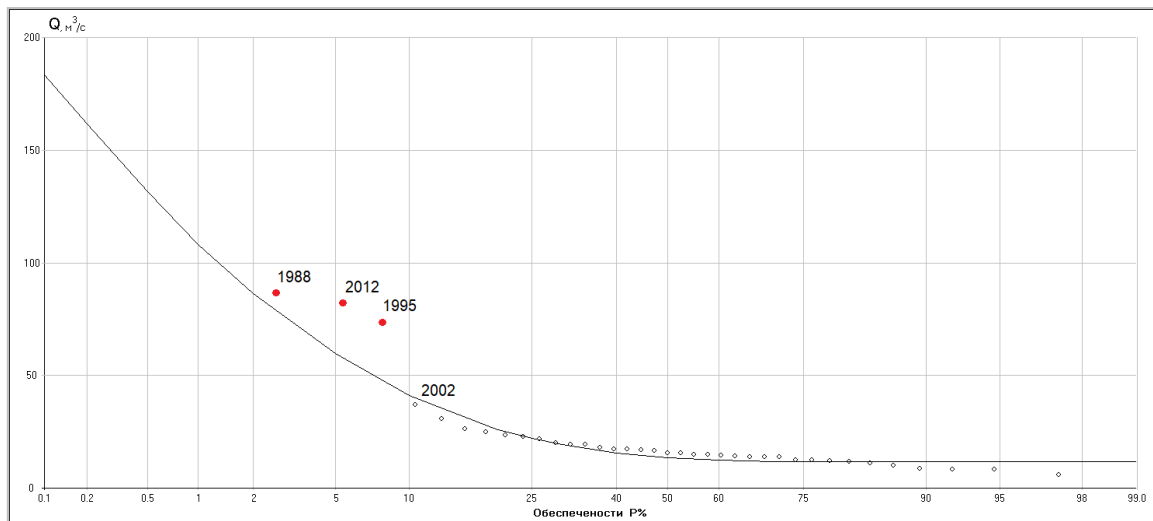


Рисунок 12. Кривая обеспеченности рассчитанных максимальных суточных расходов (м³/с) для р. Цемес (красным отмечены паводки 1988, 2012 и 1995 года)

4.3. Моделирование выдающихся паводков на р. Цемес

Для расчета срочных максимальных расходов на 1-часовом интервале на реке Цемес были использованы подробные данные плувиограмм ливневых паводков в 1988, 2002 и 2012 годах. За 19-20 июня 1988 г. данные плувиографа на станции Новороссийск были получены из метеорологического ежегодника и осреднены до равномерного часового интервала, для события 2002 года использовались данные соседних метеорологических станций Анапа и Джубга, данные за 6-7 июля 2012 года заимствованы из работы (Болгов, М.В., Коробкина, Е.А., 2013).

1988 год. Дожди высокой интенсивности наблюдались 20 июня 1988 года и сопровождалась прохождением нескольких смерчей. Плувиограф метеорологической станции Новороссийск зафиксировал в этот день выпадение 179,4 мм осадков в течение 4 часов 50 минут. Средняя интенсивность выпадения осадков составила 0.6 мм/мин, максимальная достигала значения 2.3 мм/мин. Интересно, что по данным (Болгов, М.В., Коробкина, Е.А., 2013) количество осадков на горной метеостанции Мархотский перевал, находящейся на небольшом удалении от станции Новороссийск, не превысило 7 мм за тот же период наблюдения. Осадки 20 июня выпадали уже на увлажненную поверхность водосбора, так как в предшествующие трое суток выпало в сумме 97,6 мм осадков (19 июня – 24.7 мм,

18 июня – 24.5 мм, 17 июня – 48.4 мм), что усугубило масштаб паводка. Подтверждением этого является рассчитанная величина запаса воды на водосборе. На рис. 13 видно, что за трое суток (17-19 июня) до наблюдения катастрофического расхода количество влаги в бассейне увеличилось более чем на 70 мм, а 20 июня ее количество достигло рекордных 355 мм. Таким образом, значительная часть выпавших осадков не смогла просочиться в почво-грунты и сформировала максимальный расход. Развитие паводка наблюдалось с 11 часов 20 июня. Расход воды в это время составил 61 м³/с. Своего максимума 1-часовой рассчитанный расход воды достиг в 13 часов и составил 688 м³/с (рис. 13).

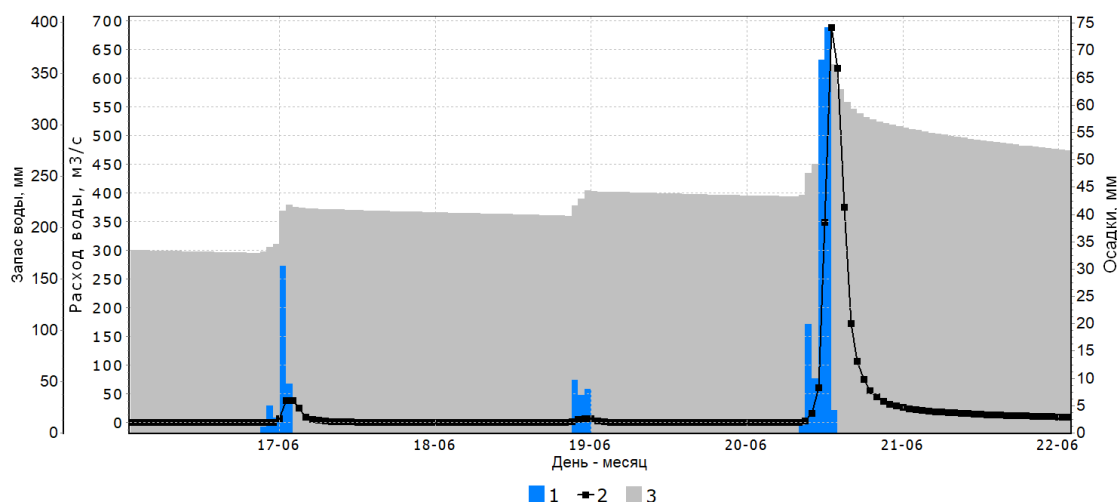


Рисунок 13. Развитие паводка 20 июня 1988 года, р. Цемес (г. Новороссийск); 1 – осадки, мм, 2 – рассчитанный 1-часовой расход воды, м³/с, 3 – запас воды в бассейне, мм

2002 год. Еще один катастрофический паводок в районе г. Новороссийска наблюдался в период с 5 по 9 августа 2002 года. Согласно (Панов В. Д. и др., 2012) в некоторые дни за 30-50 минут выпадало до 75 мм осадков. Также, как и в случае 1988 года ливневые осадки усугублялись смерчами, которые приносили на сушу дополнительное количество морской воды. В результате прохождения наводнения были затоплены железнодорожный узел станции Новороссийск, территории портов и много зданий, где уровень воды на первых этажах превышал полтора метра (Панов В. Д. и др., 2012). Всего по данным МЧС г. Новороссийска было подтоплено 2940 домов, 183 разрушены. Общий ущерб составил 1,5 млрд. руб., число погибших достигло 58 человек (Панов В. Д. и др., 2012).

Подробных данных об осадках 5-9 августа 2002 года на станции Новороссийск найдено не было, однако имеются плювиограммы осадков на ближайших станциях Анапа и Джубга. Суммарно за несколько дней на этих двух метеостанциях выпало 371 мм. Согласно (Колтерманн К. П. и др., 2012) количество осадков за тот же период в Новороссийске составило 362 мм, что равняется полугодовой норме. Суммарные данные об осадках на

метеостанциях Анапа и Джубга были использованы для моделирования максимального расхода воды. Максимальный рассчитанный расход воды 7 августа 2002 года составил 284 м³/с (рис. 14).

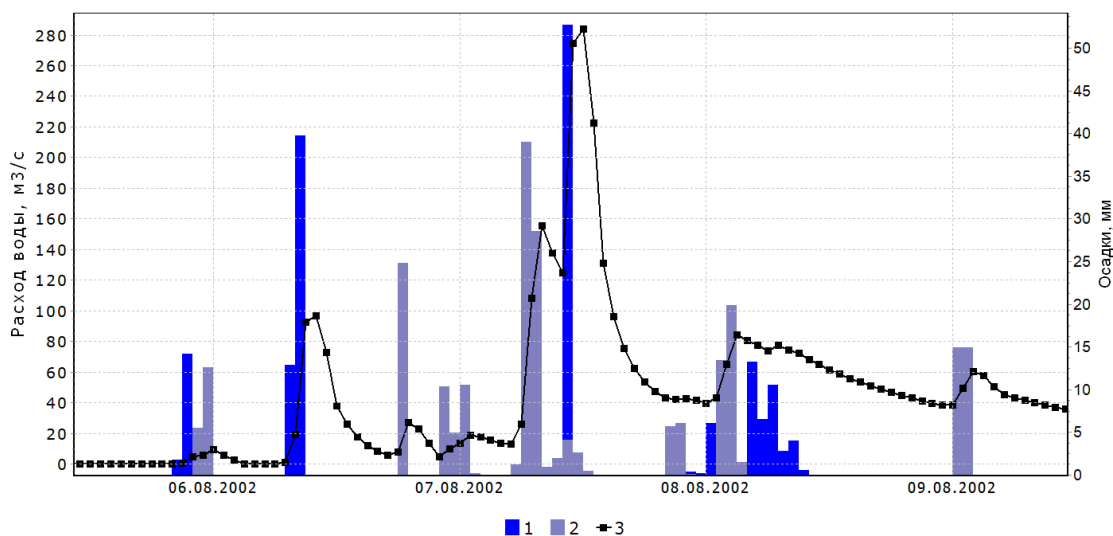


Рисунок 14. Развитие паводка 6-9 августа 2002 года, р. Цемес (г. Новороссийск); 1 – осадки на м/с Анапа, мм, 2 – осадки на м/с Джубга, мм, 3 – рассчитанный 1-часовой расход воды, м³/с

2012 год. При рассмотрении события 6-7 июля 2012 года отмечено, что осадки, охватившие Черноморское побережье на участке Геленджик – Новороссийск, а также Крымский и Абинский районы, не наблюдались ранее за всю историю инструментальных наблюдений. В результате катастрофического паводка в г. Крымске погибли более 170 человек и был нанесен колоссальный материальный ущерб (Панов В. Д. и др., 2012).

Согласно (Болгов, М.В., Коробкина, Е.А., 2013) за сутки с 7 часов 6 июля по 7 часов 7 июля 2012 года на метеостанции Новороссийск был зафиксирован исторический максимум осадков 275 мм. Основной объем осадков, сформировавших катастрофический паводок, выпал с 22 часов 6 июля по 3 часа ночи 7 июля. В этот период интенсивность осадков достигала 35–45 мм в час (0.58 – 0.75 мм/мин), а их суммарное количество составило 157 мм. По результатам моделирования всего за два часа расход воды увеличился с 78 м³/с до своего максимального значения, которое составило 361 м³/с около 4 часов утра 7 июля (рис. 15). Суточное распределение элементов водного баланса во время паводка 6 и 7 июля составило: осадки – 156 и 158 мм, сток – 13 и 86 мм соответственно. Более высокий по сравнению с 6 числом сток 7 июля обусловлен, как и в случае паводка 1988 года, тем, что почво-грунты достигли своей максимальной влагонасыщенности за время прохождения осадков 6 июля. Несмотря на то, что во время паводка 1988 года выпало в полтора раза меньше осадков, чем

в 2012 году, более высокие расходы воды в 1988 году являются результатом более высокой интенсивности выпадения осадков.

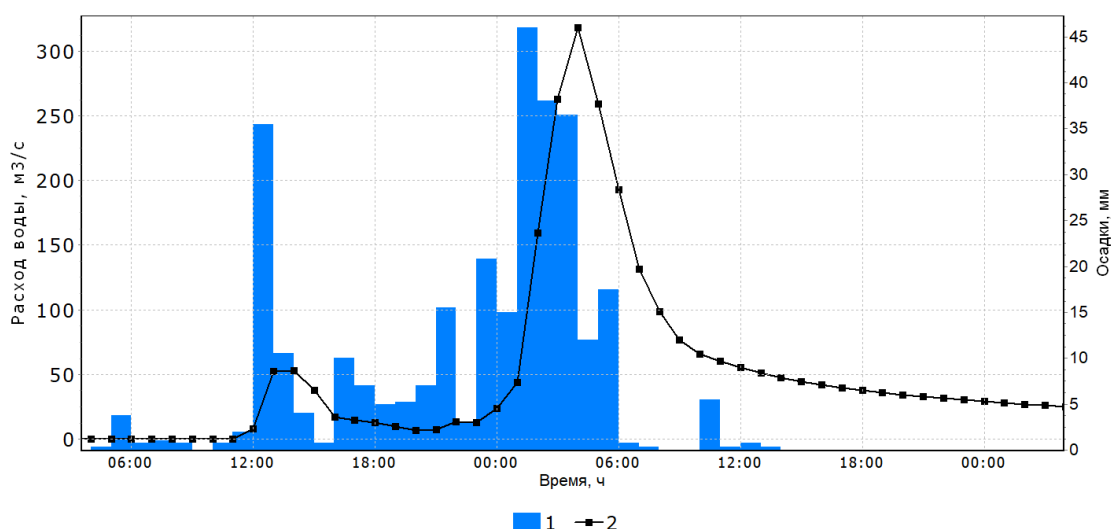


Рисунок 15. Развитие паводка 6-7 июля 2012 года, р. Цемес (г. Новороссийск); 1 – осадки, мм, 2 – рассчитанный 1-часовой расход воды, м³/с

4.4. Расчет максимальных расходов воды дождевых паводков р. Цемес стандартными методами и их сравнение с величинами, полученными по модели «Гидрограф»

Поскольку река Цемес относится к категории неизученных рек, т.е. без осуществления наблюдений за стоком, для сопоставления величин стока, рассчитанных по модели «Гидрограф», был произведен расчет максимальных расходов воды дождевых паводков обеспеченностью $P = 1; 2; 5$ и 10% согласно рекомендациям (СП-33-101-2003, 2004) двумя способами – методом аналогии по редукционной формуле и при отсутствии рек-аналогов по формуле предельной интенсивности ливня.

В качестве аналога принят водосбор р. Адегой – ст-ца Шапсугская (125 км^2), несмотря на то, что он отделен от побережья Чёрного моря Мархотским хребтом, высоты которого достигают порядка 700 м. Длина ряда наблюденных максимальных расходов воды составила 41 год, она включает в себя величину расхода воды $463 \text{ м}^3/\text{с}$, зафиксированного в 2012 г. Величина суточного слоя осадков вероятностью превышения 1% для метеостанции Новороссийск составила 209 мм (2012 г.), ранее величина суточного слоя осадков Н1% для метеостанции Новороссийск составляла 180 мм (1988 г.) (Георгиевский, В.Ю., Ткаченко Ю.Ю., 2012). В работе (Болгов М.Б., Коробкина Е.А., 2013) приведены сведения о том, что суточный слой осадков в 2012 году составил 275 мм. В табл. 8 приведены результаты

расчета расходов дождевого паводка различной обеспеченности по реке аналогу (редукционной формуле) и как для неизученной реки в случае отсутствия рек-аналогов (по формуле предельной интенсивности).

Таблица 8.

Результаты расчета максимальных расходов различной обеспеченности на основе методики (СП-33-101-2003, 2004).

Способ расчета	Q _{1%}	Q _{2%}	Q _{5%}	Q _{10%}
Как неизученный_Н1% 209 мм	267	251	219	197
Как неизученный_Н1% 275 мм	378	355	310	280
По аналогу	285	244	184	141

Таким образом, максимальные рассчитанные расходы паводков в 2002 и 2012 годах, 284 и 361 м³/с, соответствуют порядкам величин максимального расхода 1% обеспеченности, рассчитанных на основе методики (СП-33-101-2003, 2004), и могли «наблюдаться» дважды за 11 лет подряд. Модельный максимальный расход для события 1988 года, 688 м³/с, превышает эту же величину в два раза.

Заключение

Для оценки потенциальной возможности применения гидрологической модели «Гидрограф» для расчета срочных максимальных расходов воды как в изученных, так и в неизученных бассейнах малых рек Черноморского побережья Кавказа были решены следующие задачи:

1. Выполнена схематизация водосборов рр. Туапсе, Вулан, Дюрсо, Адерба и Цемес и выделены стокоформирующие комплексы, систематизированы параметры гидрологической модели «Гидрограф» для основных ландшафтов.
2. Проведено моделирование процессов формирования стока в бассейне р. Туапсе с суточным шагом за период с 1966 по 2013 гг. Получены суточные гидрографы стока и распределение элементов водного баланса. Медианное значение критерия эффективности Нэша-Сатклиффа при моделировании с расчетным шагом сутки составило 0,60 для периода продолжительностью 32 года, что позволило оценить полученные результаты как удовлетворительные. Критерии результатов расчета в большей степени зависят от входной информации об осадках.
3. Рассчитаны 1-часовые расходы воды в бассейне р. Туапсе для трех катастрофических паводков (1991, 2005, 2010 гг.) с использованием данных плювиографов, двух метеорологических станций в пределах рассматриваемого бассейна.
4. Проведены численные эксперименты, в которых использовались дополнительные сведения об осадках, вызвавших катастрофический паводок 1 августа 1991 г. Так, сумма суточных осадков на метеостанции «Горный» отличается в два раза (или на 150 мм) согласно разным источникам.
5. Оценены величины срочных и суточных расходов для паводка в июне 2005 г., когда наблюдения за стоком на р. Туапсе не проводились. Результаты расчета элементов водного баланса показали, что возможны несоответствия в опубликованных данных срочных и суточных расходов, а также всего периода наблюдений с 15 октября по 31 декабря 2010 г. Невязка водного баланса за период 1.10–31.12.2010 г. составила около 1000 мм.
6. Проведено моделирование процессов формирования стока в бассейне р. Цемес с суточным шагом за период с 1977 по 2013 гг.
7. Рассчитаны 1-часовые расходы воды в бассейне р. Цемес для трех катастрофических паводков (1988, 2002, 2012 гг.) на основе подробных данных о ходе ливневых осадков. Рассчитанные максимальные расходы могут быть приняты за срочную величину расхода и составили 688, 284 и 361 м³/с соответственно. Рассчитан потенциально возможный суточный расход 1% обеспеченности для р. Цемес.

На основании полученных результатов сделаны следующие выводы:

- 1) Результаты моделирования катастрофических паводков на реке Цемес 1988 и 2012 гг. указывают на необходимость учета состояния водосбора, предшествующего экстремальному гидрологическому событию – именно уникальное сочетание стокоформирующих и метеорологических факторов определяют его величину.
- 2) Результаты исследования на примере р. Туапсе опровергают мнение о неспособности распределенных детерминированных гидрологических моделей оценивать срочные расходы воды из-за слишком большого временного шага и показывают, что гидрологическая модель «Гидрограф» при наличии метеорологических данных детального разрешения (например, данных плювиографов) может использоваться в задаче оценки срочных расходов воды на малых водосборах в случае отсутствия наблюдений (2005 г.) или уточнения их величин, когда опубликованные данные о расходах могут носить неопределенный характер (случай 2010 г.). Применение методов моделирования позволяет также проводить численные эксперименты с входными метеорологическими данными в условиях их недостаточности (пример 1991 г.).

Практическая значимость работы заключается в создании методики расчета экстремальных характеристик водного режима для исследуемого региона, в том числе и для неизученных бассейнов с учетом основных процессов формирования стока. На настоящий момент ограниченность данных об осадках не позволяет использовать методы моделирования для массовых расчетов рядов срочных расходов воды, однако имеющиеся в наличие данные плювиографов чрезвычайно полезны для анализа факторов формирования катастрофических паводков и совершенствования методов математического моделирования.

Основные публикации Колупаевой А.Д. по теме исследования

Результаты, полученные в рамках бакалаврской выпускной квалификационной работы, были опубликованы в рецензируемых периодических изданиях: одна публикация – в РИНЦ и ВАК и 1 входит в список журналов Scopus.

Статьи в журналах:

1. Макарьева О. М., Нестерова Н. В., Виноградова Т. А., Бельдиман И. Н., **Колупаева А.Д.** Расчет характеристик катастрофических паводков неизученной реки Цемес (г. Новороссийск, Черноморское побережье России) на основе гидрологической модели «Гидрограф» // Вестник Санкт-Петербургского университета. Науки о Земле, 2019, выпуск 1, С. 24-43
2. Макарьева О.М., Виноградова Т.А., Нестерова Н.В., Виноградов А.Ю., Бельдиман И.Н., **Колупаева А.Д.** Моделирование катастрофических паводков в бассейне р. Туапсе» // ГЕОРИСК, 2018, Т.12. №3. С.34-45.

Основные результаты, составившие содержание данной работы, докладывались на российских и международных конференциях: 5-й Международная конференция «СЕЛЕВЫЕ ПОТОКИ: катастрофы, риск, прогноз, защита»; XIV Общероссийская научно-практическая конференция и выставка «Перспективы развития инженерных изысканий в строительстве в Российской Федерации»; Международная конференция «Третьи Виноградовские чтения. Грани гидрологии»; II Всероссийская конференция «Гидрометеорология и экология: достижения и перспективы развития»; Международная научно-практическая конференция студентов, аспирантов и молодых ученых «География в современном мире: вековой прогресс и новые приоритеты»; Международная конференция «European Geosciences Union 2018».

Тезисы докладов:

1. Макарьева О.М., Нестерова Н.В., Шихов А.Н., **Колупаева А.Д.**, Виноградова Т.А. Восстановление характеристик катастрофических паводков в Краснодарском крае 24-26 октября на основе комплексного гидрометеорологического моделирования (гидрологическая модель «Гидрограф» и климатическая модель WRF) // труды XIV Общероссийской научно-практической конференции и выставки «Перспективы развития инженерных изысканий в строительстве в Российской Федерации». Изд-во ООО «Геомаркетинг». С. 197-201.

2. **Колупаева А.Д.**, Макарьева О.М., Нестерова Н.В., Бельдиман И.Н. Гидрологическое моделирование стока рек Черноморского побережья в России на примере реки Туапсе и сравнение результатов с расчетом по стандартным методикам // Труды международной конференции «Третьи Виноградовские чтения. Грани гидрологии.». Изд-во "Наукоемкие технологии", С. 893-897.
3. Макарьева О.М., Виноградова Т.А., Нестерова Н.В., Виноградов А.Ю., Бельдиман И.Н., **Колупаева А.Д.** Моделирование катастрофических паводков в бассейне р. Туапсе // Труды 5-й Международной конференции «Селевые потоки: катастрофы, риск, прогноз, защита». Изд-во "Универсал", С. 450-463.
4. Виноградова Т.А., Макарьева О.М., Нестерова Н.В., Бельдиман И.Н., **Колупаева А.Д.** «Flash floods at the Black Sea coast of Russia: the challenges of hydrological characteristic assessment in data-sparse mountainous region», EGU, 2018.
<https://meetingorganizer.copernicus.org/EGU2018/EGU2018-16836.pdf>
5. Anastasia Pashovkina, **Alexandra Kolupaeva**, Olga Makarieva , Nataliia Nesterova Modelling extreme flood characteristic at two mountainous watersheds of Russia with contrasting conditions using historical pluviograph data. EGU, 2018.
<https://meetingorganizer.copernicus.org/EGU2018/EGU2018-1096.pdf>
6. **Колупаева А.Д.**, Макарьева О.М., Нестерова Н.В., Виноградова Т.А. Методы расчета характеристик катастрофических паводков в бассейнах рек Черноморского побережья Краснодарского края в условиях нестационарности окружающей среды // Труды II Всероссийской конференции «Гидрометеорология и экология: достижения и перспективы развития. СПб.: ХИМИЗДАТ. С. 355-357.
7. **Колупаева А.Д.**, Макарьева О.М. Расчет и сравнение максимальных характеристик речного стока малых рек Черноморского побережья различными методами // Материалы XIV БОЛЬШОГО ГЕОГРАФИЧЕСКОГО ФЕСТИВАЛЯ. С.41-43.
8. **A.D.Kolupaeva**, N.V.Nesterova Calculation of catastrophic floods characteristics in the basin of the Tuapse River // Материалы Школы «Моделирование и прогнозирование речных потоков и управление гидрологическими рисками: к новому поколению методов» (“Modelling and forecasting of river flows and managing hydrological risks: towards a new generation of methods”).
9. N.V.Nesterova, **A.D.Kolupaeva** Modeling of catastrophic floods on ungauged Tsemes River at Novorossiysk» // материалы Школы «Моделирование и прогнозирование речных потоков и управление гидрологическими рисками: к новому поколению методов» (“Modelling and forecasting of river flows and managing hydrological risks: towards a new generation of methods”).

10. **Колупаева А.Д., Макарьева О.М., Нестерова Н.В., Шихов А.Н** Расчет катастрофических паводков на территории Черноморского побережья с использованием гидрологической модели «Гидрограф» и климатической модели WRF // Труды Всероссийской научно-практической конференции «Современные проблемы гидрометеорологии и устойчивого развития Российской Федерации». СПб.: РГГМУ. С. 247-248.

Список использованной литературы

1. Semenova O., Lebedeva L., Vinogradov Yu., 2013. Simulation of subsurface heat and water dynamics, and runoff generation in mountainous permafrost conditions, in the Upper Kolyma River basin, Russia // *Hydrogeology Journal*, Vol. 21, No. 1. P. 107–119.
2. Moriasi D.N., Arnold J.G., Van Liew M.W., Bingner R.L., Harmel R.D., Veith T.L. Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations // *Amer. Soc. Agric. Biol. Eng.*, 2007. Vol. 50. P. 885-900.
3. Nash J.E., Sutcliffe J.V., 1970. River flow forecasting through conceptual models part I — A discussion of principles // *Journal of Hydrology*, 17. Vol. 10, №. 3. P. 282–290.
4. Алексеевский Н.И., Магрицкий Д.В., Колтерманн П.К., Торопов П.А., Школьный Д.И., Белякова П.А. Наводнения на Черноморском побережье Краснодарского края // *Водные ресурсы*, 2016. Том 43. № 1. С. 3–17.
5. Асарин А.Е., Жиркевич А. Н. О необходимости разработки методики расчета вероятного максимального паводка для инженерно-гидрологических расчетов в России // *Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление*, 2012. № 4. С. 53–64.
6. Базелюк А.А., Лурье П. М. Катастрофические паводки и наводнения на юге России: Причины возникновения и оценка последствий. Речной сток: пространственно-временная изменчивость и опасные гидрологические явления // *Сборник трудов Третьей конференции*, Москва, 2014. С. 44–60.
7. Болгов, М.В., Коробкина, Е.А. Реконструкция дождевого паводка на реке Адагум на основе математических моделей формирования стока // *Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление*, 2013. С. 87-102.
8. Виноградов, Ю. Б., Виноградова, Т. А., Математическое моделирование в гидрологии. Академия, Москва, 2010, 544 с.
9. Виноградов Ю. Б., Виноградова Т. А., Современные проблемы гидрологи, Издательский центр «Академия», М., 2008, 318 с.
10. Воробьев, Ю. Л., Акимов, В. А., Соколов, Ю. И. Катастрофические наводнения начала XXI века: уроки и выводы. Изд-во ООО «ДЭКС-ПРЕСС», Москва, 2003, 352 с.
11. Георгиевский, В.Ю., Ткаченко Ю. Ю., 2012. Катастрофический паводок в бассейне р. Адагум 6–7 июля 2012 г. и его причины. URL: <http://meteoweb.ru/biblio/27.pdf> (дата обращения: 15.01.2019).
12. ГОСТ 22.0.03-97 Безопасность в чрезвычайных ситуациях. Природные чрезвычайные ситуации. Термины и определения. М.: ИПК Издательство стандартов, 2000. 11 с.

13. Дрыгина Т.Ф. (ред.). Справочник агрогидрологических свойств почв Северного Кавказа, Волгоградской и Астраханской областей. Гидрометеорологическое издательство, Ленинград, 1967.
14. Колтерманн, К.П., Добролюбов, С.А., Алексеевский, Н.И. Природные и социальные риски в береговой зоне Черного и Азовского морей // Изд-во Триумф, Москва, 2012. 92 с.
15. Метеорологический ежемесячник. (1964 – 1983), I-XIII, т. 13. Гидрометеиздат. Ростов-на-Дону.
16. Нестерова Н.В., Макарьева О.М., Виноградова Т.А., Лебедева Л.С. Моделирование процессов формирования стока зоны Байкало-Амурской магистрали на основе данных полигона «Могот» // Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление, 2018. № 1. С. 18–36.
17. Панов В.Д., Базелюк А.А., Лурье П.М. Реки Черноморского побережья Кавказа: гидрография и режим стока. // Донской издательский дом, Ростов-на-Дону, 2012.
18. Рождественский, А.В., Лобанова, А.Г. Приложения к пособию по определению расчетных гидрологических характеристик // ФБГУ «Государственный гидрологический институт», Санкт-Петербург, 2010.
19. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2018619084. Комплексная программа распределенной гидрологической модели «Гидрограф», правообладатель О.М. Макарьева, дата регистрации 30.07.2018.
20. СП 33-101-2003. Определение основных расчетных гидрологических характеристик. Госстрой России, Москва, 2004.
21. Справочник по климату СССР. 1966. Выпуск 3. Гидрометеиздат. Ленинград.
22. Ландшафтная карта СССР, 1980. Ответственный редактор: И.С. Гудилин. Масштаб 1:2500000 (в 1 см. 25 км.). Министерство геологии СССР.
23. Метеорологический ежемесячник. I-XIII, 1964 – 1983, 13. Гидрометеиздат. Ростов-на-Дону.
24. Ткаченко Ю.Ю., Волосухин В.А. Прогнозирование параметров паводков на реках Краснодарского края // Гидротехника, 2013. Вып. 14. № 4. С. 16–20.
25. <http://atlas.mcx.ru/materials/egrpr/content/3sem.html> Единый государственный реестр почвенных ресурсов России, 2018, (дата обращения: 06.09.2018).
26. <http://tass.ru/info/2071994> Информационное агентство России, 2018, (дата обращения: 25.07.2018).
27. <http://www.geo.ru/ekologiya/peregretoe-more> (дата обращения: 25.07.2018)